

03.2

Влияние концентрации капель воды в аэрозольном облаке на скорости их испарения

© Р.С. Волков, С.А. Керимбекова, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: romanvolkov@tpu.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2021 г.

В окончательной редакции 27 июля 2021 г.

Принято к публикации 4 августа 2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований интегральных характеристик испарения капель воды в составе аэрозольного облака (варьируемые параметры: начальный радиус капель 0.1–0.25 mm, концентрация капель воды 0.03–0.11/m³, температура продуктов сгорания 573–873 K). Установлены диапазоны изменения массовой скорости испарения воды в зависимости от концентрации капель в аэрозольном облаке и их начальных размеров. Получены аппроксимационные выражения для установленных зависимостей. Предложен подход к определению скорости испарения капель аэрозоля с учетом известных значений скорости испарения одиночной капли.

Ключевые слова: капля воды, аэрозоль, испарение, концентрация капель.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.22.51723.18791

Результаты исследований процессов испарения капель в газовой среде с различной концентрацией жидкой и газовой фаз имеют большое практическое значение, так как испарение капель различных жидкостей является основным процессом многих газопарокапельных технологий [1]. Актуальна задача выбора исходных параметров аэрозоля для управления характеристиками испарения [2]. Особенно важно оптимизировать эти процессы при высоких температурах газовой среды (> 500 K) [3], так как это позволит существенно сэкономить энергетические и временные ресурсы. В настоящее время, несмотря на известность определенной совокупности публикаций в области изучения испарения аэрозольных потоков, в частности [4], недостаточно информации о значениях массовых скоростей испарения малых по размерам капель (< 0.5 mm). Это связано как со значительными трудностями проведения экспериментов, так и с высокими требованиями к погрешностям измерения ключевых параметров, обусловленными взаимным влиянием соседних капель [5]. При разработке математических моделей часто используется допущение о том, что вся подведенная к поверхности капель тепловая энергия расходуется на реализацию фазовых превращений [6]. В [7] показано, что важную роль играют процессы прогрева капель, а также парогазовых слоев вокруг них, в особенности при рассмотрении аэрозольных потоков. При этом на характеристики испарения значительное влияние оказывают как дисперсность аэрозоля, так и объемная концентрация капель в потоке. Поэтому рациональным представляется экспериментальное определение зависимостей скоростей испарения жидкости в высокотемпературной среде от концентрации капель и их размеров. В этом состоит цель настоящей работы.

При проведении экспериментов использован стенд (рис. 1, *a*), схема которого аналогична описанной в [7,8]. Стенд оснащен передвижной системой регистрации для измерения концентрации и размеров капель на разных участках движения аэрозоля в вертикальном канале с высокотемпературными газами. Для генерации аэрозольного потока применялась система, состоящая из емкости 1 с водой (под давлением $P = 200–300$ kPa), канала подачи жидкости 2 и форсунки 3. Использовалась распылительная форсунка, генерирующая полидисперсный поток капель радиусами $R_d = 0.1–0.25$ mm (рис. 1, *b*). Аэрозольный поток 4 исследуемой дисперсности попадал в цилиндрический канал 5 (высота 1 m, внутренний диаметр 0.2 m) с продуктами сгорания. В основании канала 5, состоящего из жаростойкого (до 2000 K) светопрозрачного материала, устанавливалась подложка 7 (высота 0.1 m, внутренний диаметр 0.15 m, внешний диаметр 0.19 m), заполненная по периметру керосином марки ТС-1 [8]. Перед проведением каждого опыта топливо в подложке 7 поджигалось, цилиндр заполнялся восходящим потоком продуктов сгорания. Скорость движения потока газов регулировалась за счет изменения давления с использованием вытяжной системы 14 и составляла в экспериментах $U_g \approx 1.5$ m/s. Контроль температуры продуктов сгорания ($T_g = 573–873$ K) осуществлялся по методике [3] хромель-алюмелевыми термопарами 6 (диапазон 223–1473 K, погрешность 2.5 K), установленными на трех высотах (0.25, 0.5, 0.75 m) относительно основания цилиндрического канала. Установлено, что температура продуктов сгорания снижалась от 873 до 573 K по мере движения от основания канала до его верхней части.

Для регистрации размеров капель аэрозоля применялся оптический метод „Shadow Photography“ (SP) [7,8].

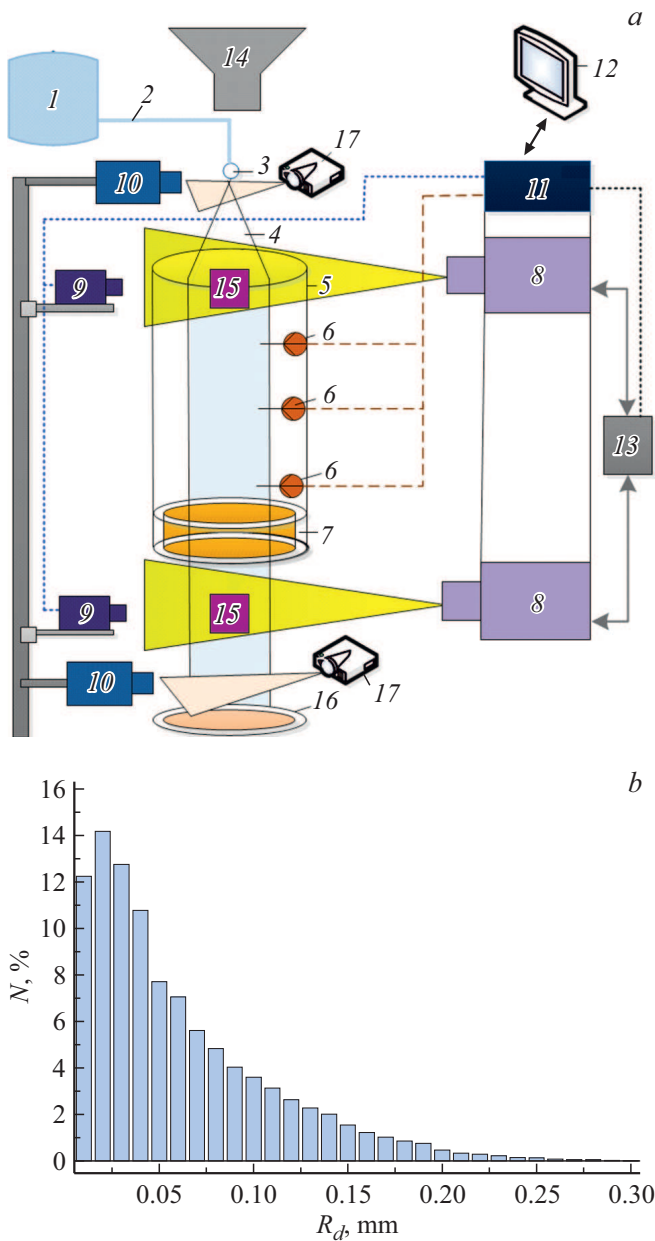


Рис. 1. *a* — схема экспериментального стенда. 1 — емкость с водой, 2 — канал подачи воды, 3 — распылительная форсунка, 4 — капельный поток, 5 — жаропрочный цилиндр, 6 — термопары, 7 — горелка, 8 — двойной импульсный Nd:YAG-лазер, 9 — кросскорреляционная камера, 10 — скоростная видеокамера, 11 — синхронизатор для персонального компьютера, кросскорреляционных камер и лазера, 12 — персональный компьютер, 13 — генератор лазерного излучения, 14 — вытяжная система, 15 — рассеивающий диффузный экран со световодом, 16 — каплеуловитель, 17 — световой прожектор. *b* — распределение количества капель N по размерам для используемой в экспериментах форсунки.

Для реализации метода SP использовался кросскорреляционный программно-аппаратный комплекс на базе двойного твердотельного Nd:YAG-лазера 8 „Quantel EverGreen 70“ (длина волны 532 nm, частота повторе-

ния 15 Hz, максимальная энергия в импульсе 72 mJ) и CCD-видеокамеры 9 „ImperX IGV-B2020M“ (разрешение кадра 2048×2048 pix, частота съемки до 25 fps, разрядность 8 bit) с установленным макрообъективом „Nikon Micro-Nikkor 200mm f/4D ED-IF A“. Nd:YAG-лазер 8 посредством оптического световода подключался к рассеивающему диффузному экрану 15. Создавалась фоновая подсветка измерительной области. Выполнялась процедура видеофиксации изображений капель с использованием CCD-видеокамеры 9. Полученные данные обрабатывались с использованием программного обеспечения „Actual Flow“. На первом этапе осуществлялось выделение границ капель программным фильтром „Laplace Edge Detection“. Далее выполнялась нейтрализация шумов на изображениях с использованием „Median Filter“. На последнем шаге задавался порог бинаризации изображений и с использованием процедуры „Bubbles Identification“ определялись радиусы капель (R_d). Погрешности определения R_d не превышали 1.5%. Для каждой капли вычислялось абсолютное уменьшение ее среднего радиуса после прохождения канала с высокотемпературными продуктами сгорания (ΔR).

Параллельно с описанными выше экспериментами выполнялись исследования по определению времени прохождения каплями канала с продуктами сгорания. Применялась система (рис. 1, *a*), состоящая из высокоскоростной CMOS-видеокамеры 10 „Phantom MIRO M310“ (разрешение изображения 1280×800 pix, скорость съемки до $6.5 \cdot 10^5$ fps) и светодиодного прожектора 17 „Multiled PT-V9 GS Vitec“ (количество светодиодов 24, световой поток 7700 lm, мощность 84 W, угол рассеяния 30°). Видеокамерой 10 регистрировались капли на входе и выходе из кварцевого канала 5. По результатам анализа видеозаписей определялись момент вхождения капель в канал с продуктами сгорания (t_1), а также момент их появления на выходе канала (t_2). Вычислялось время прохождения каплями канала $\Delta t_d = t_2 - t_1$. Погрешность определения Δt_d не превышала 0.03 s.

При идентичных начальных условиях выполнялось не менее десяти экспериментов. По результатам каждого эксперимента вычислялось значение массовой скорости испарения [9]:

$$W_e = \rho_d(R_d - R'_d)/\Delta t_d = \rho_d\Delta R/\Delta t_d,$$

где ρ_d — плотность воды [kg/m^3]; R_d, R'_d — начальное и конечное значения радиуса [m] (определялись по аналогии с [8]); Δt_d — время прохождения каплями канала с продуктами сгорания [s]. Погрешность определения массовой скорости испарения капель не превышала 2.5%.

На рис. 2 представлены установленные зависимости скоростей испарения воды от концентрации и начального размера капель. Из рис. 2, *a* видно, что для трех исследуемых концентраций капель ($0.03, 0.05$ и $0.11/\text{m}^3$) динамика изменения скорости испарения сопоставима.

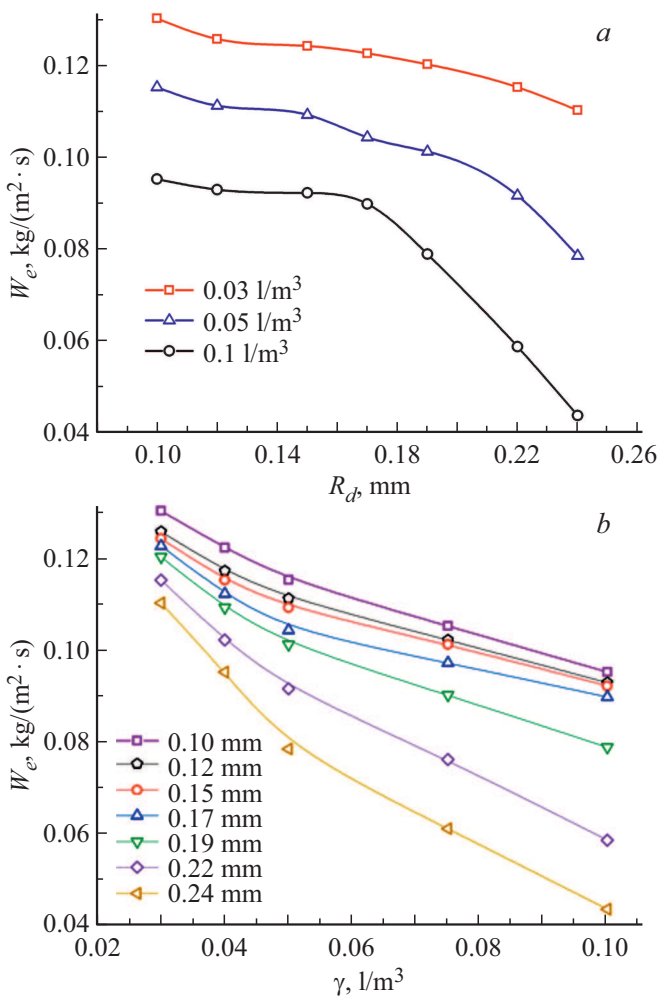


Рис. 2. Значения скоростей испарения капель воды в высокотемпературной газовой среде ($T_g = 573\text{--}873 \text{ K}$) с учетом их разных начальных размеров R_d (a) и относительной концентрации γ (b).

Для капель в потоке с концентрацией $\sim 0.03 \text{ l}/\text{m}^3$ значения массовой скорости испарения W_e снижались на 15% с ростом размера капель в диапазоне $0.1\text{--}0.24 \text{ mm}$. При концентрации $\sim 0.05 \text{ l}/\text{m}^3$ снижение W_e составило 32%, при $0.1 \text{ l}/\text{m}^3$ — 56%. Таким образом, показано, что с ростом начальной концентрации капель в потоке происходит более интенсивное уменьшение W_e . Однако из рис. 2, a также видно, что чем выше концентрация капель аэрозоля, тем ниже значения скорости испарения при равных начальных радиусах капель. Это обусловлено, во-первых, ростом концентрации паров в аэрозольном потоке и долей жидкой фазы (вода вследствие высокой теплоемкости существенно снижает температуру газов вокруг) в газопарокапельной смеси и, во-вторых, снижением межкапельного расстояния в облаке, что приводит к более сильному влиянию на характеристики испарения соседних капель. По результатам экспериментов (рис. 2) получена группа зависимостей для прогнозирования скорости (в $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) испарения капель в составе

аэрозольного облака с концентрацией $0.03\text{--}0.1 \text{ l}/\text{m}^3$ при известном начальном размере капель

$$W_e = a + bR_d + cR_d^2 \quad (1)$$

и известной их концентрации в потоке

$$W_e = \exp(a + b\gamma + c\gamma^2). \quad (2)$$

Коэффициенты аппроксимационных функций (1) и (2) приведены в табл. 1 и 2 (при варьировании параметров потока в диапазоне $R_d = 0.1\text{--}0.24 \text{ mm}$, $\gamma = 0.03\text{--}0.1 \text{ l}/\text{m}^3$). Дополнительно в таблицах приведены значения коэффициентов детерминации (R^2) для полученных аппроксимационных выражений.

Эксперименты показали (рис. 2, b), что для капель с размерами $0.1\text{--}0.17 \text{ mm}$ увеличение их концентрации в потоке от 0.03 до $0.1 \text{ l}/\text{m}^3$ приводит к уменьшению значений скорости испарения на 24–28%. Для капель с радиусами $R_d > 0.17 \text{ mm}$ уменьшение скорости испарения более значительно и составило 33–62%. Скорее всего, такой результат обусловлен усиливающимся влиянием свойств воды. В частности, определяющую роль играют высокая теплоемкость жидкости и теплота парообразования. Чем больше размеры капли, тем выше значение энергии, которую необходимо подвести к ее поверхности для интенсификации прогрева и фазовых превращений. Чем выше температура газовой среды, тем интенсивнее реализуются прогрев и испарение капли. При этом в потоке дымовых газов с изменяющейся температурой важную роль играют фактор протяженности канала и градиенты температуры. От этого существенно зависит подводимый к поверхности капли тепловой поток. Также важную роль играет фактор полидисперсности потока капель. Крупные капли при испарении создают буферную паровую зону для мелких капель, что снижает скорости прогрева и испарения последних. Это приводит к изменению скоростей движения капель и интенсификации их взаимодействия в режимах коагуляции, дробления, отскока и разлета.

На практике определение скоростей испарения мелких капель (особенно в аэрозольном потоке) является сложной задачей, требующей специализированного высокоточного оборудования. Поэтому по результатам исследований (рис. 2) предложен подход к определению скорости испарения капель аэрозоля ($R_d = 0.1\text{--}0.25 \text{ mm}$), предполагающий ее прогнозирование с учетом известных/вычисленных значений скорости испарения одиночной капли. Использовались значения скорости испарения одиночной капли, полученные в условиях конвективного обтекания горячим потоком воздуха [9]. Так, при температурах $\sim 773 \text{ K}$ (соответствует средним значениям в экспериментах с водяным аэрозолем) значение массовой скорости испарения для одиночной капли при $R_d^* \approx 1.33 \text{ mm}$ составило $W_e^* \approx 0.032 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, при $R_d^* \approx 1.53 \text{ mm}$ — $W_e^* \approx 0.029 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, при $R_d^* \approx 1.68 \text{ mm}$ — $W_e^* \approx 0.025 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Аппроксимация

Таблица 1. Коэффициенты функции $W_e = f(R_d)$ (при $R_d = 0.1-0.24$ mm)

Концентрация капель, l/m^3	Коэффициенты параболической функции			R^2
	a	b	c	
0.03	0.13002	0.03482	-0.048044	0.93794
0.05	0.09611	0.34487	-1.71357	0.98210
0.1	0.03638	0.95543	-3.86257	0.99251

Таблица 2. Коэффициенты функции $W_e = f(\gamma)$ (при $\gamma = 0.03-0.1$ l/m^3)

Начальный радиус капель, mm	Коэффициенты экспоненциальной функции			R^2
	a	b	c	
0.1	-1.84714	-7.2452	22.23561	0.98616
0.12	-1.88323	-7.37762	24.84468	0.99137
0.15	-1.88796	-7.80628	28.96855	0.98578
0.17	-1.82845	-10.91542	51.62496	0.97842
0.19	-1.84682	-10.47471	36.10507	0.99007
0.22	-1.84025	-11.5712	17.54703	0.99266
0.24	-1.68838	-18.705	44.71094	0.99092

результатов настоящей работы и результатов [8] показала, что при $\gamma = 0$ и $R_d = 0.1-0.25$ mm (для $T_g = 750$ K) значения W_e совпадают и изменяются в среднем в диапазоне $0.15-0.17$ $kg/(m^2 \cdot s)$. На основании данного заключения получена формула для оценки скорости испарения капель аэрозоля

$$W_e = k(R_d^*/R_d)^2 W_e^* \tag{3}$$

на основе коэффициента

$$k = [-0.005 + 1.666 \exp(-24.058\gamma)](R_d^*/R_d)^{-(1.658 + 7.584\gamma)}, \tag{4}$$

где R_d, R_d^* — радиусы капли аэрозоля и одиночной капли [mm]; W_e, W_e^* — массовые скорости испарения капли аэрозоля и одиночной капли [$kg/(m^2 \cdot s)$]. На рис. 3 приведена номограмма, иллюстрирующая значения коэффициента k при отношении $R_d^*/R_d = 4-18$ и концентрации капель аэрозоля $\gamma = 0-0.1$ l/m^3 . Как итог, экспериментально определив скорость испарения (W_e^*) крупной одиночной капли ($R_d^* > 1$ mm) с использованием формул (3) и (4), задаваясь значениями среднего радиуса капель R_d и их концентрации γ , можно вычислить скорость испарения капель аэрозоля в потоке. Численные оценки показали, что погрешность определения W_e с использованием такого подхода составила 7–10%. В дальнейшем целесообразными представляются расширение предложенного подхода к определению W_e на больший диапазон температур и оценка его правомерности при определении скоростей испарения капель различных многокомпонентных жидкостей.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что скорости прогрева и испарения капель воды как элементов аэрозоля в высокотемпературной газовой

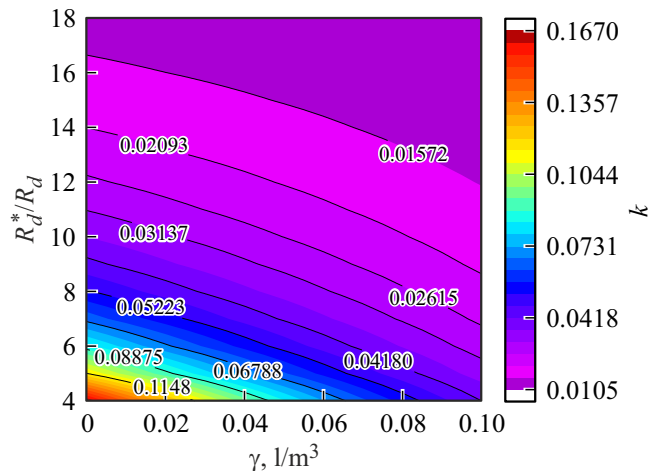


Рис. 3. Номограмма, иллюстрирующая значения коэффициента k при разном отношении R_d^*/R_d и относительной концентрации капель аэрозоля γ .

среде главным образом зависят от их концентрации и начальных размеров. Полученные по результатам обработки опытов математические выражения $W_e = f(R_d)$, $W_e = f(\gamma)$ и $W_e = f(W_e^*)$ позволяют выполнять прогнозирование интенсивности испарения аэрозольных облаков по результатам опытов с одиночными каплями.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-38-00007).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.М. Бочкарева, М.К. Лей, В.В. Терехов, В.И. Терехов, ИФЖ, **92** (5), 2208 (2019). DOI: 10.1007/s10891-019-02031-4
- [2] П.В. Акулич, ИФЖ, **92** (2), 404 (2019). DOI: 10.1007/s10891-019-01943-5
- [3] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, Н.Н. Золоторёв, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина, Письма в ЖТФ, **46** (8), 25 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49304.18209
- [4] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, А.И. Коноваленко, К.Г. Перфильева, Письма в ЖТФ, **46** (12), 40 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.12.49527.18300
- [5] G. Castanet, L. Perrin, O. Caballina, F. Lemoine, Int. J. Heat Mass Transfer., **93**, 788 (2016). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.064
- [6] V. Ramanaukas, G. Miliauskas, Int. J. Heat Mass Transfer., **131**, 546 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.095
- [7] И.С. Войтков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, Письма в ЖТФ, **43** (6), 48 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.06.44403.16525
- [8] G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, R.S. Volkov, O.V. Vysokomornaya, Int. J. Therm. Sci., **108**, 218 (2016). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.019
- [9] R.S. Volkov, P.A. Strizhak, Appl. Therm. Eng., **127**, 141 (2017). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.040